

Застосування лазерного термоциклування для підвищення якості плазмових зносостійких покриттів

Л.Ф.Головко¹ • О.Д. Кагляк¹ • В.В. Романенко¹ • М.С. Блощин¹

Received: 22 September 2022 / Accepted: 14 November 2022

Анотація. Стаття покликана розкрити запропонований, розроблений та досліджений новий спосіб підвищення якості міцності зчеплення плазмових зносостійких покриттів на зовнішніх поверхнях зброї, виготовленої із високолегованих, жароміцних сталей, застосуванням додаткового циклічного (3–4)-х кратного їх нагрівання лазерним випромінюванням до температур 0,6–0,8 Тпл протягом кількох мілісекунд.

Підвищення ресурсу використання і якості зовнішнього вигляду зброї нанесенням на її зовнішні поверхні зносостійких покриттів з підвищеною міцністю зчеплення з основою застосуванням плазмового газотермічного напилення з наступним лазерним їх термоциклуванням.

Визначення основних фактори і параметрів процесу лазерного термоциклування плазмових покриттів, їх взаємозв'язків, розробка алгоритму визначення умов лазерного термоциклуванням, встановлення математичним моделюванням і експериментальними дослідженнями раціональної області їх значень.

Наведено результати математичного моделювання лазерного циклічного нагрівання плазмових покриттів ХТН різної товщини, що дозволяє визначити параметри опромінення, які забезпечують їх нагрівання до температур на границі “покриття–основа” $\leq 1000^\circ\text{C}$, на поверхні – до $T < T_{\text{пл}}$, при максимальних швидкостях охолодження. Доведено, що лазерне термоциклування забезпечує підвищення міцності зчеплення покриттів з основою з 14–18 до 90–110 МПа, зменшення пористості з 10–12% до 7–8%, що обумовлено перерозподілом легуючих складових на межі “покриття–основа”, з утворенням між ними елементів металургійного зв'язку, сприяє значному збільшенню зносостійкості і зниженню коефіцієнту тертя внаслідок утворення вторинних ультрадисперсних плівкових структур.

Вважаємо лазерне термоциклування плазмових покриттів ефективним способом підвищення їх якості і міцності зчеплення з основою.

Ключові слова: плазмове покриття, лазерне термоциклування, опромінення, нагрівання, міцність зчеплення, металургійний зв'язок, зносостійкість.

Вступ

На сьогоднішній день для виготовлення озброєння, у тому числі деталей вогнепальної зброї, застосовуються конструкційні покращені леговані сталі 38ХНЗМФА, 40ХН2МА та ін. Такі сталі піддають гартуванню при 820–850 °С в оливі з наступним високим відпуском при 550–600 °С. Після такої обробки в сталі утворюється структура “сорбіт”, яка має оптимальне

співвідношення міцності і в'язкості. В результаті покращення та легування нікелем сталь набуває високу границю текучості, малу чутливість до концентраторів напружень, високу границю витривалості і достатній запас в'язкості. Молібден, присутній в сталі, підвищує її теплостійкість. Згідно з довідковими даними, згадані сталі можуть використовуватись при температурах до 400–450 °С. Крім того, для сталі 38ХНЗМФА характерна мала чутливість до якості поверхні і ударних навантажень. До недоліків можна віднести труднощі в обробці різанням і схильність до утворення флокенів.

Аналіз вітчизняних і закордонних гарматних сталей показав, що вони мають практично однаковий хімічний склад і близькі фізико-механічні властивості, але не здатні протистояти потужним імпульсним термомеханічним навантаженням, пороховій ерозії. Опір

✉ Л.Ф. Головко
leongolovko@gmail.com

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

поверхні каналу ствола зношуванню в значній мірі залежить від структурного стану і відповідних йому теплофізичних і механічних властивостей металу поверхневого шару. Умови зношування зовнішніх поверхонь озброєння суттєво відрізняються від вище згаданих. В основному в процесі експлуатації має місце абразивне та абразивно-корозійне зношування, в тому числі, в умовах дії підвищених температур. Тому здається доцільним, на першому етапі даного дослідження, з'ясувати можливість застосування для підвищення зносостійкості таких поверхонь, замість азотування, більш продуктивних і економічно ефективних комбінованих процесів, що включають різні висококонцентровані джерела енергії такі, як плазмовий струмінь, лазерне випромінювання й інші, дія яких раціонально сконцентрована в просторі і часі. Пошуку і розробці згаданого і найбільш ефективного процесу зміцнення зовнішніх поверхонь, таких виробів, присвячено дану публікацію.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Для підвищення зносостійкості деталей різних машин й механізмів у промисловості широко використовують плазмові покриття. Основним їх недоліком є недостатня міцність зчеплення з матеріалом основи. Для її збільшення застосовуються різні технології, призначені для інтенсифікації дифузійних процесів на межі “покриття-основа”. Позитивний ефект досягається, але він є незначним тому, що міцність зчеплення покриттів збільшується максимум до 20–25 кг/мм², що є для умов експлуатації вогнепальної зброї явно недостатнім, тим більше, що, при цьому, різко підвищується трудомісткість і собівартість процесу обробки.

Перспективним напрямком підвищенні експлуатаційних властивостей робочих поверхонь деталей машин є застосування комбінованих методів нанесення покриттів [1–3]. Комбіновані методи нанесення покриттів базуються на використанні двох або трьох методів, кожен з яких дозволяє підсилити ту чи іншу їх експлуатаційну властивість.

При виборі комбінованих процесів нанесення покриттів необхідно враховувати наступні положення:

- по-перше, в процесі нанесення не допускається розплавлення як основи, так і покриття, оскільки це призводить до зміни їх хімічного складу і властивостей, погіршення шорсткості поверхонь;

- по-друге, термічні процеси при нанесенні покриттів повинні забезпечувати сприятливий характер розподілу залишкових напружень. Зокрема, в покритті і в зоні з'єднання його з основою деталі мають бути залишкові напруження стискання, які сприяють підвищенню опору втому;

- по-третє, що є однією із найважливіших вимог, покриття в перехідному шарі повинно мати елементи металургійного зв'язку з основою, що значно впливає на міцність зчеплення його з основою, у тому

числі при дії знакозмінних навантажень.

- по-четверте, тривалість і локальність процесу нанесення покриттів повинна бути мінімальною, щоб його структура не мала небажаних змін.

Критерієм вибору комбінованих способів нанесення покриттів є порівняння витрат на його реалізацію, рівень збільшення комплексу механічних властивостей виробів.

Незважаючи на велику кількість розробок в області підвищення властивостей покриттів, отриманих газотермічним напиленням, дослідження в цьому напрямку продовжують активно розвиватися і на даний час, причому вони набули нової спрямованості на модифікування і додаткову обробку покриттів, обумовлених можливістю їх застосування для підвищення якості поверхонь вогнепальної зброї.

Кожна технологія нанесення покриттів має свою нішу оптимальних умов використання. На даний час ще не існує методології синтезу багатоопераційних технологій нанесення функціональних покриттів. При інтегруванні технологій переважно використовується емпірично – інтуїтивний підхід [4]. Вирішальним фактором у виборі первинних і завершальних технологій є наявність на підприємстві окремих видів устаткування і можливість інтегрувати їх в єдиний технологічний цикл.

Модифікування напилених покриттів на поверхнях виробів можливо проводити як зміною структури поверхневих шарів, так і зміною їх хімічного складу.

Істотний ефект багаторазового підвищення мікротвердості і зносостійкості газотермічних покриттів забезпечує електронно-променева обробка [3]. Аналіз їх структури показав, що середній розмір зерен в покритті зменшується від сотень мкм до сотень нанометрів, а мікротвердість збільшується в 5 разів. Межа витривалості підвищується на 60–80%, а міцність зчеплення – в 2,5–3,5 рази.

Після плазмового напилення є доцільним застосування хіміко-термічної обробки [5]. Так, після боровання, зносостійкість напилених покриттів на сталі Св-08, при сухому терті, підвищується в 100 разів. Підвищується також адгезійна міцність напилених покриттів. ХТО характеризується великою тривалістю процесу і не дозволяє проводити обробку великогабаритних виробів. У зв'язку з цим проблема підвищення міцності і зносостійкості газотермічних покриттів є актуальною.

Іонне азотування газотермічних покриттів на сталях 40Х13 і Х18Н10Т забезпечує підвищення мікротвердості від 6,5 ГПа до 15 ГПа в поверхневому шарі товщиною від 5 мкм до 40 мкм. При цьому суттєво збільшується і їх зносостійкість, до 8 разів [6].

Більшість комбінованих способів виготовлення покриттів вимагають відносно високих температур і тривалої обробки.

Високі температури, як правило, негативно позначаються на “об'ємних” властивості відновлюваних деталей. Тому, при виборі способу нанесення покриття

та управління технологічним процесом необхідно вживати заходи, спрямовані на збереження вихідних “об’ємних” механічних властивостей деталей.

Значний інтерес для нанесення комбінованих функціональних покриттів представляють методи надшвидкісного загартування і лазерної обробки [7].

Головне завдання лазерної обробки газотермічних покриттів є підвищення їх адгезії до основи. Як наслідок, зростання адгезійної міцності забезпечує підвищення зносостійкості поверхонь з покриттям і їх антифрикційних властивостей. Для газотермічних покриттів підвищення зносостійкості після лазерної обробки пов’язано зі зростанням на (15–20) % твердості покриття. Завдяки лазерній обробці газотермічні покриття отримують дисперсну структуру з мінімальною кількістю пор, з рівномірним розподілом хімічних елементів. У зв’язку з цим, істотно підвищується зносостійкість в умовах граничного тертя і абразивного зношування, стійкість до високотемпературної корозії при забезпеченні найменшого термічного впливу на основу. Лазерна обробка газотермічних покриттів підвищує їх стійкість до високотемпературної газової корозії [7]. З метою зниження енергетичних витрат використовують спосіб комплексної лазерної і плазмової обробки.

Слід зазначити, що лазерна обробка, як і електронно-променева, обумовлюють утворення неоднорідної гетерогенної макроструктури газотермічних покриттів і не забезпечують їх хімічного модифікування.

Керуючи процесами структуроутворення, при високоенергетичному впливі можна конструювати градієнтні шари з необхідним комплексом експлуатаційних властивостей.

Відомо, що при лазерному імпульсному нагріванні в сталях й інших сплавах за певних умов опромінення спостерігається аномальне масоперенесення, що супроводжується значним перерозподілом легуючих елементів [8]. Такий ефект доцільно було б ініціювати на межі між матеріалом покриття й основою і забезпечити в такий спосіб між ними наявність елементів металургійного зв’язку, що і обумовить можливість значного підвищення міцності зчеплення таких покриттів навіть в умовах імпульсних циклічних навантажень. Ефективним шляхом вирішення завдання підвищення експлуатаційних характеристик газотермічних покриттів, їх міцності зчеплення з основою є способи їх багаторазового надшвидкісного лазерного термоцикування в області температур фазових перетворень [9, 10].

Об’єднання процесу плазмового нанесення функціональних покриттів з модифікацією поверхні і наступним лазерним їх термоцикуванням дозволить створити нові комбіновані методи інженерії поверхні.

Мета та задачі дослідження

Проведені дослідження ставили за мету розробку комбінованого процесу, що включає плазмове напи-

лення з наступним лазерним термоцикуванням поверхневих шарів покриттів, що забезпечує підвищення їх фізико-механічних властивостей і міцності зчеплення з основою та зносостійкості робочих поверхонь стволів вогнепальної зброї.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувалися наступні завдання:

- на основі аналізу умов роботи деталей озброєння, розробити процес лазерного термоцикування покриттів, отриманих плазмовим напиленням;
- визначити основні фактори й параметри процесу лазерного термоцикування плазмових покриттів, встановити взаємозв’язки між ними;
- розробити математичну модель процесу лазерного нагрівання плазмових покриттів та встановити основні закономірності теплових процесів при різних умовах їх лазерного опромінення;
- виявити особливості формування перехідного шару між плазмовим покриттям і основою при його обробці лазерним випромінюванням;
- встановити закономірності зміни структури, твердості та розподілу легуючих елементів між покриттям і основою при лазерному циклічному нагріванні;
- з’ясувати вплив технологічних параметрів лазерного термоцикування плазмових покриттів на їхню міцність зчеплення з основою, напружений стан і триботехнічні характеристики.

Математичне моделювання теплових процесів, що відбуваються в плазмових покриттях при лазерному нагріванні

Одним з завдань даної роботи є моделювання температурного поля, зумовленого дією рухомого лазерного променя на двошарове середовище за умови, що верхній шар представляє собою однофазне покриття, нанесене плазмовим напиленням. Така задача виникла у зв’язку з розробкою комбінованого процесу плазмового напилення покриття з наступним лазерним його термоцикуванням.

На процеси масоперенесення при лазерному термоцикуванні впливають як властивості покриття, так і основи, а також параметри опромінювання, які у сукупності формують характеристики якості майбутнього покриття і виробу в цілому [8].

При розробці та встановленні основних закономірностей аналізованого комбінованого процесу, його доцільно уявити, як технологічну систему, що включає логічно пов’язану послідовність процесів обробки з усіма їх факторами і параметрами та експлуатаційними характеристиками виробів (рис. 1).

Основними параметрами лазерного пучка, що надають значний вплив на процеси структуроутворення, є довжина хвилі випромінювання, його потужність при використанні безперервно діючого джерела або енергія в імпульсі і його форма, тривалість і частота –

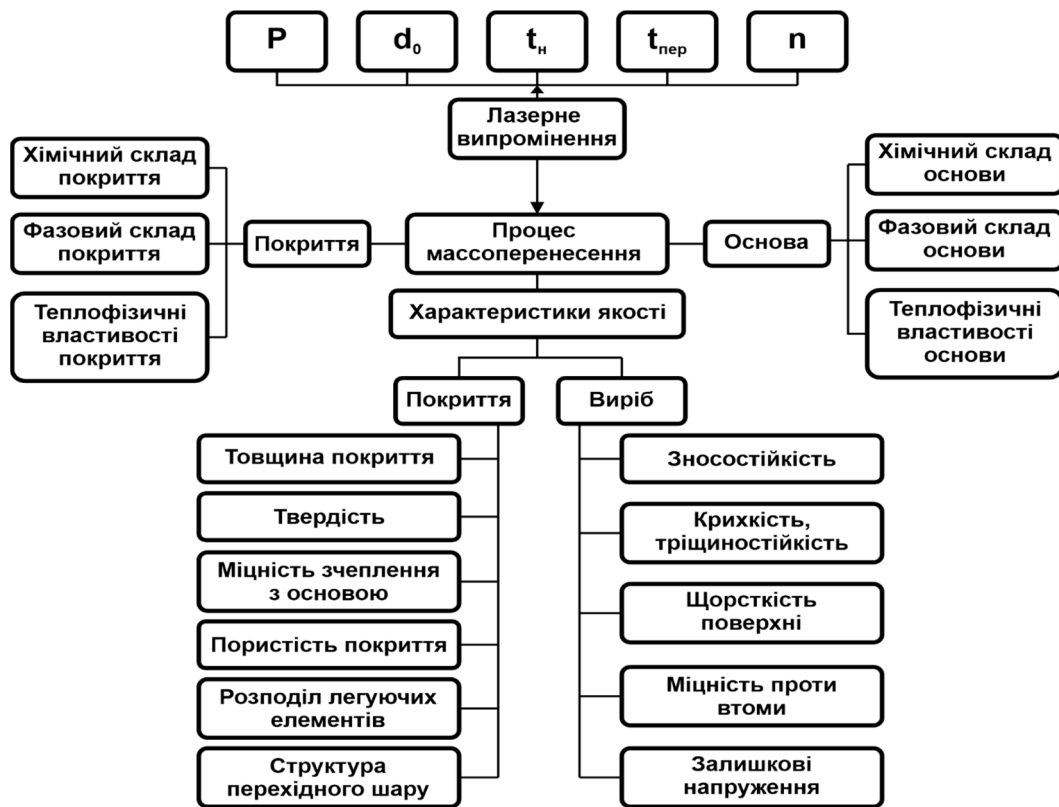


Рис. 1. Основні фактори і параметри процесу лазерного термоцикування: P – потужність лазерного випромінення, d_0 – діаметр зони фокусування, t_n – час нагрівання, $t_{пер}$ – час перерви між імпульсами нагрівання, n – кількість імпульсів нагрівання

при імпульсно-періодичному режимі. Найважливішими параметрами є також площа та форма зони фокусування лазерного пучка, а також просторовий розподіл інтенсивності випромінення в ній.

До властивостей оброблюваних матеріалів, які обов'язково треба враховувати при розробці такого комбінованого процесу, слід віднести їхню поглинальну здатність до лазерного випромінювання, довжину хвилі останнього. Іншими важливими характеристиками є температура плавлення, густина, коефіцієнти

температуропровідності, теплопровідності і теплоємності, початкова температура матеріалу, що обробляється.

Матеріал покриття попередньо плазмовим способом наноситься на підкладку, після чого нагрівається лазерним випромінюванням. Покриття являє собою однофазне середовище.

Розрахункова область, що включає підкладку та покриття, на поверхню якого діє промінь лазера, що пересувається зі сталою швидкістю V уздовж осі Ox , показана на рис. 2.

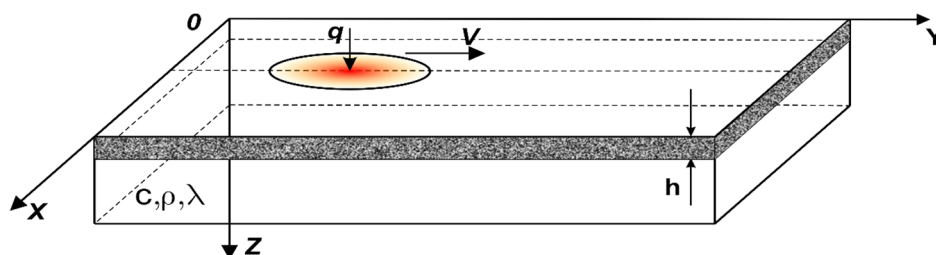


Рис. 2. Схема дії лазерного променя на деталь з плазмовим покриттям

Деталь має форму прямокутного паралелепіеда зі сторонами L_x, L_y, L_z та початкову температуру U_n , при чому товщина верхнього шару h . Її поверхні знаходяться у процесі теплообміну з навколишнім середовищем, температура якого U_c . Верхня поверхня (поверхня обробки) опромінюється променем лазера з довільним розподілом потужності по перерізу. Промінь рухається по будь-якій траєкторії зі швидкістю V . Розподіл потужності описується законом $W(x, y, t)$, а його дія викликає на поверхні обробки тепловий потік з розподілом густини потужності $q(x, y, t)$. Через деякий проміжок часу τ , що залежить від теплофізичних властивостей матеріалу, встановлюється квазістаціонарний стан, за якого зона нагріву металу характеризується незмінними розмірами і пересувається разом з джерелом теплового впливу.

У загальному випадку нестационарний розподіл температури $U(x, y, z, t)$ у металевому зразку описується нелінійним рівнянням теплопровідності:

$$c\rho \frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \lambda \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \lambda \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \lambda \frac{\partial U}{\partial z}, \quad (1)$$

де $c(z, U)$ – ефективне значення теплоємності матеріалу, який враховує наявність фазових переходів і структуру покриття, $\rho(z, U)$ – густина матеріалу, $\lambda(z, U)$ – ефективне значення теплопровідності.

Для нижнього шару значення c, ρ, λ є постійними щодо температури, тому можна записати рівняння в такий спосіб:

$$c\rho \frac{\partial U}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right)$$

$$x \in [0, L_x], y \in [0, L_y], z \in [h, L_z], t \in [0, T_i]. \quad (2)$$

Початкова умова: $U(x, y, z, 0) = U_n$.

Крайова умова на поверхні обробки в зоні й поза зоною дії лазерного випромінювання відповідно:

$$\lambda \frac{\partial U(x, y, 0, t)}{\partial z} + q(x, y, t) = 0;$$

$$\lambda \frac{\partial U(x, y, 0, t)}{\partial z} + \alpha [U(x, y, 0, t) - U_c] = 0. \quad (3)$$

Крайові умови на інших поверхнях розрахункової області:

$$\lambda \frac{\partial U(x, y, L_z, t)}{\partial z} + \alpha [U(x, y, L_z, t) - U_c] = 0;$$

$$\lambda \frac{\partial U(0, y, z, t)}{\partial x} + \alpha [U_c - U(0, y, z, t)] = 0;$$

$$\lambda \frac{\partial U(L_x, y, z, t)}{\partial x} + \alpha [U(L_x, y, z, t) - U_c] = 0;$$

$$\lambda \frac{\partial U(x, 0, z, t)}{\partial y} + \alpha [U_c - U(x, 0, z, t)] = 0;$$

$$\lambda \frac{\partial U(x, L_y, z, t)}{\partial y} + \alpha [U(x, L_y, z, t) - U_c] = 0.$$

$$U_{покр.}(x, y, h, t) = U_{осн.}(x, y, h, t), \quad (4)$$

де $U_{покр.}(x, y, h, t)$ – температура в шарі покриття, $U_{осн.}(x, y, h, t)$ – температура основи.

При розв'язуванні задачі, було використано різницеву схему розщеплення за координатами з адаптивною сіткою, яка змінювалася на кожному часовому кроці й згущала вузли в зонах більших градієнтів шуканої функції.

Моделювання проводилось для матеріалів: підкладка – сталь 40ХН2МА, плазмове покриття – ХТН (12Х18Н10Т+CrB₂+TiB₂). Геометричні параметри зразка: $L_x = L_y = L_z = 1$ см. Розрахунки проводилися в системі одиниць – кг, см, с, при значеннях параметрів випромінювання й навколишнього середовища: $P = 1000$ Вт, $r = 0.25$ см, $v = 0.5$ м/хв, $\alpha = 50$ В(м²/град), $U_c = 20^\circ$ С.

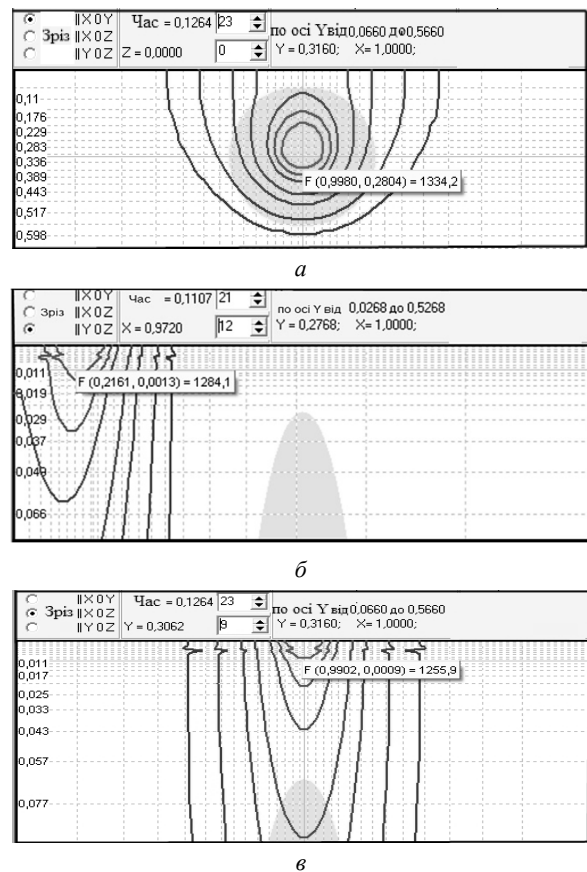


Рис. 3. Розподіл температур на поверхні зразка з плазмовим покриттям вздовж (а) і поперек (б) напрямку його переміщення та по глибині (в) зони термічного впливу лазерного випромінювання (інтервал – 200°C)

Аналіз результатів моделювання показав, що існують умови лазерного опромінення, при яких, температура нагрівання на межі “плазмове покриття-основа” лежить в межах 1000 °С, що і було потрібно. Проте температура поверхні дещо може перевищувати температуру плавлення. Якщо для певної частини завдань лазерної обробки плазмових покриттів, такі умови є припустимими, то для другого способу обробки, без гарантованого оплавлення поверхні, цей режим непридатний. З метою зміни температури поверхні до рівня 1250–1300 °С та збереження температури нагріву на межі покриття з основою на рівні 1000 °С доцільно насамперед збільшити діаметр зони фокусування, у другу – зменшити потужність випромінювання. На рис. 3 *a, б*, в наведені розподіли температур у координатах ХОУ (*a*), ХОZ (*б*), YOZ(*в*) для оптимального режиму лазерного нагрівання та подальшого термоцикування.

Експериментальне лазерне технологічне обладнання

При виконанні експериментальних досліджень було використано Nd:YAG – лазер DY044 з потужністю випромінювання до 4,4 кВт та довжиною хвилі випромінювання $\lambda = 1,06$ мкм, виробництва фірми “Rofin-Sinar” (Німеччина), який працює в безперервному і імпульсно-періодичному режимах.

Лазерна установка DY 044 представляє собою твердотільний лазер, призначений для реалізації різних технологічних операцій, у тому числі термічного зміцнення модифікацією структури. На рис. 4 представлено загальний вигляд лазерної установки і відповідний технологічний модуль, де проводилось опромінення зразків, тобто здійснювалось лазерне термоцикування.

На виході випромінювача розташована оптична система, яка фокусує лазерний пучок на оптоволокну або лазерний пучок попадає в поглинач із водяним охолодженням. З оптоволокна лазерний пучок потрапляє в коліматор, де, за допомогою системи оптичних елементів, набуває певних геометричних розмірів та потрапляє на скляну лінзу (Ø 50мм), призначену для його фокусування. Для фокусування випромінювання лазера DY044 нами використовувалася кварцова лінза з фокусною відстанню 200 мм. Технічні характеристики лазерів, що працюють в безперервному і імпульсному режимах випромінювання і які були задіяні при виконанні даного дослідження, наведено в таблиці 1.

Експериментальні дослідження паралельно проводились з використанням мобільної лазерної системи ALM - 300 (ALPHA LASER GmbH, Німеччина), що працює в імпульсному режимі випромінювання. Обладнання призначене для використання у промисловості з метою зміцнення, зварювання, та наплавлення.

Основним елементом устаткування є випромінювач на основі двох твердотільних активних елементів на алюмоіттрієвому гранаті, легованого неодимом (YAG: Nd), і імпульсних ламп накачування. Загальний вигляд установки наведено на рис. 5.

Особливістю лазерної установки є те, що систему фокусування можна легко перемістити в потрібне положення з різною програмованою швидкістю. Заготовка, що обробляється, механічно під візуальним контролем за допомогою насадки для мікроскопу або за допомогою відео, розташовується, орієнтується і переміщується (рис. 5 *a, б*). Система дозволяє керувати осями переміщення за допомогою джойстика (тобто за допомогою додаткового зовнішнього блоку керування).

Обладнання дозволяє підключити додаткову зовнішню обертову вісь для заготовок, які потрібно обертати.



a



б

Рис. 4. Загальний вигляд Nd:YAG-лазера DY044 з терміналом керування (*a*) і технологічний модуль з системою фокусування лазерного випромінювання (*б*)

Таблиця 1. Технічні характеристики використаних в роботі потужних технологічних лазерів

Модель лазера	Довжина хвилі випромінювання, мкм	Режим генерації	Потужність, Вт	Частота імпульсів, Гц	Якість випромінювання, мм-мрад	Розмір лазерного пучка у фокусі, мм	Витрати охолоджуючого середовища, м ³ /год	Витрати електроенергії, кВт/год
DY 044	1,06	Безперервний	240...4400	0...250	12,0	∅0,6	11,5	44
ALM-300	1,06	Імпульсн. $\tau = 5\text{--}20$ мс	300 Енергія в імпульсі $E_i=90\text{Дж}$	0...100	–	0,2	12 л	–

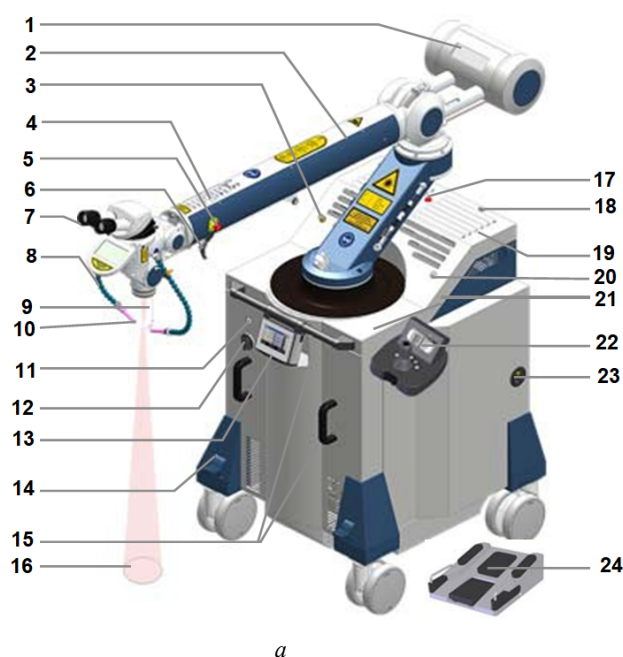


Рис. 5. Система ALM - 300 (ALPHA LASER GmbH) на базі твердотільного лазера (а) і її загальний вигляд з маніпулятором і системою фокусування (б): а – 1 – протизвага з дисплеєм параметрів лазера; 2 – рухомий лазерний модуль; 3 – підключення джойстика; 4 – клавіатура для керування параметрами лазера; 5 – рівень положення суглобу з лазерною головою; 6 – насадка для мікроскопу; 7 – підключення для додаткової осі обертання; 8 – сенсорний екран для управління системою руху; 9 – невидимий лазерний промінь; 10 – джойстик переміщення лазерної руки; 11 – зовнішній робочий блок; 12 – багатофункціональний ножний перемикач

Система дозволяє керувати осями переміщення заготовки за допомогою джойстика (тобто за допомогою додаткового зовнішнього блоку керування).

Підсилювач світла у даному лазері являє собою стріжневий кристал з легованого неодимом алюмінієво – ітрієвого гранату (Nd:YAG), який збуджується імпульсом світла від лампи накачування. Високоєфективний відбивач забезпечує концентрацію світла лампи на кристалі. Одне з дзеркал є напівпрозорим, що дозволяє виводити з резонатора сильно коліміроване випромінювання. Довжина хвилі цього випромінювання знаходиться в надзвичайно обмеженому діапазоні близько

1064 нм. Саме ця надзвичайна спрямованість і вузька смуга хвиль дозволяє енергію лазера так надзвичайно сильно сконцентрувати на оброблюваній деталі.

Висока концентрація лазерної енергії на обмеженій площі поверхні достатня для надшвидкісного імпульсного нагрівання і навіть розплавлення металу.

В устаткуванні передбачена система спостереження за процесом лазерної обробки і його налаштування з використанням спеціального мікроскопу. Насадки для мікроскопа дозволяє точно розташовувати навіть найтонші зони обробки, використовувати персональні настройки мікроскопу. Насадка для мікроскопа

оснащена 10x, 16x, 25x або 40x окулярами. Для обробки зразків необхідно встановити потрібні параметри імпульсу (табл. 2).

Таблиця 2. Характеристики випромінювання твердотілого імпульсного лазера ALM – 300

Параметри лазерного випромінювання	Значення параметру
Довжина хвилі	1064 нм
Кількість активних елементів	4
Середня потужність	300 Вт
Енергія імпульсу	90 Дж
Пікова потужність імпульсу	9 кВт
Тривалість імпульсу	0,5–20 мс
Частота імпульсів	...100 Гц
Форма імпульсу	4 форми імпульсів

Під час лазерного імпульсу насадка мікроскопу для захисту очей на короткий час темніє. Переміщення лазерного променя над заготовкою здійснюється за допомогою джойстика. Швидкість переміщення встановлюється відповідно до частоти імпульсів, щоб зони обробки розташовувались с заданим перекриттям.

Методика експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження проводились на зразках зі сталі 40ХН2МА, на поверхню яких наносилось плазмове покриття ХТН (12Х18Н10Т+ТiВ2+CrВ2),

яке потім піддавалося термоциклуванню імпульсним і безперервним лазерним випромінюванням з довжиною хвилі 1,06 мкм. Поглинальна здатність опромінованих поверхонь зразків з покриттями до лазерного випромінювання вимірювалась за допомогою піроелектричної напівкулі і становила (85–90) %.

В таблиці 3 наведені умови лазерної обробки плазмових покриттів, різної товщини імпульсним випромінюванням.

На рис. 6 наведено зовнішній вигляд зразків з плазмовим покриттям різної товщини, після однократного, двократного, трикратного і чотирикратного опромінення імпульсним випромінюванням твердотілого лазера, на режимах, які не викликають його оплавлення.

Частина зразків сталі 40Н2МА з плазмовим покриттям ХТН піддавалась як однократній так і багатократній обробці безперервним випромінюванням потужного твердотілого лазера з діодним накачуванням фірми “Rofin Sinar” при наступних умовах:

потужність випромінювання, Р (кВт)	– 1,0–3,0
діаметр зони фокусування, d (мм)	– 4
крок обробки, S (мм)	– 4
швидкість пересування лазерного променя, V (м/хв)	– 1;2;3;4;5;6;7;8

При цьому режим опромінення вибирався таким, щоб глибина зони термічного впливу перевищувала товщину нанесеного покриття, а температура на його поверхні була не більшою температури плавлення.

На рис. 7 а, б представлено зовнішній вигляд зразків сталі 40ХН2МА з плазмовим покриттям ХТН після термоциклування безперервним випромінюванням.

Таблиця 3. Умови і результати опромінення зразків сталі 40ХН2МА з плазмовим покриттям ХТН імпульсним лазерним випромінюванням

Покриття	Кількість проходів	Швидкість переміщення, мм/с	Тривалість імпульсу, мс	Частота імпульсів, Гц	Енергія в імпульсі, Дж	Середня потужність, Вт	Ширина ЗТВ	Глибина ЗТВ
покриття 50–60 мкм	1	20	5	20	8,95	179	2,07	0,19
	2	20	5	20	8,95	179	2,34	0,22
	3	20	5	20	8,95	179	2,47	0,24
	4	20	5	20	8,95	179	2,45	0,32
покриття 60–70 мкм	1	20	5	20	8,95	179	1,9	0,21
	2	20	5	20	8,95	179	2,1	0,25
	3	20	5	20	8,95	179	2,2	0,25
	4	20	5	20	8,95	179	2,7	0,27
покриття 80–90 мкм	1	15	5	20	8,95	179	2,33	0,21
	2	15	5	20	8,95	179	2,46	0,22
	3	15	5	20	8,95	179	2,58	0,22
	4	15	5	20	8,95	179	2,8	0,25
покриття 100 мкм	1	15	20	20	12,48	249,6	2,1	0,27
	2	15	20	20	12,48	249,6	2,2	0,30
	3	15	20	20	12,48	249,6	2,28	0,32
	4	15	20	20	12,48	249,6	2,30	0,35

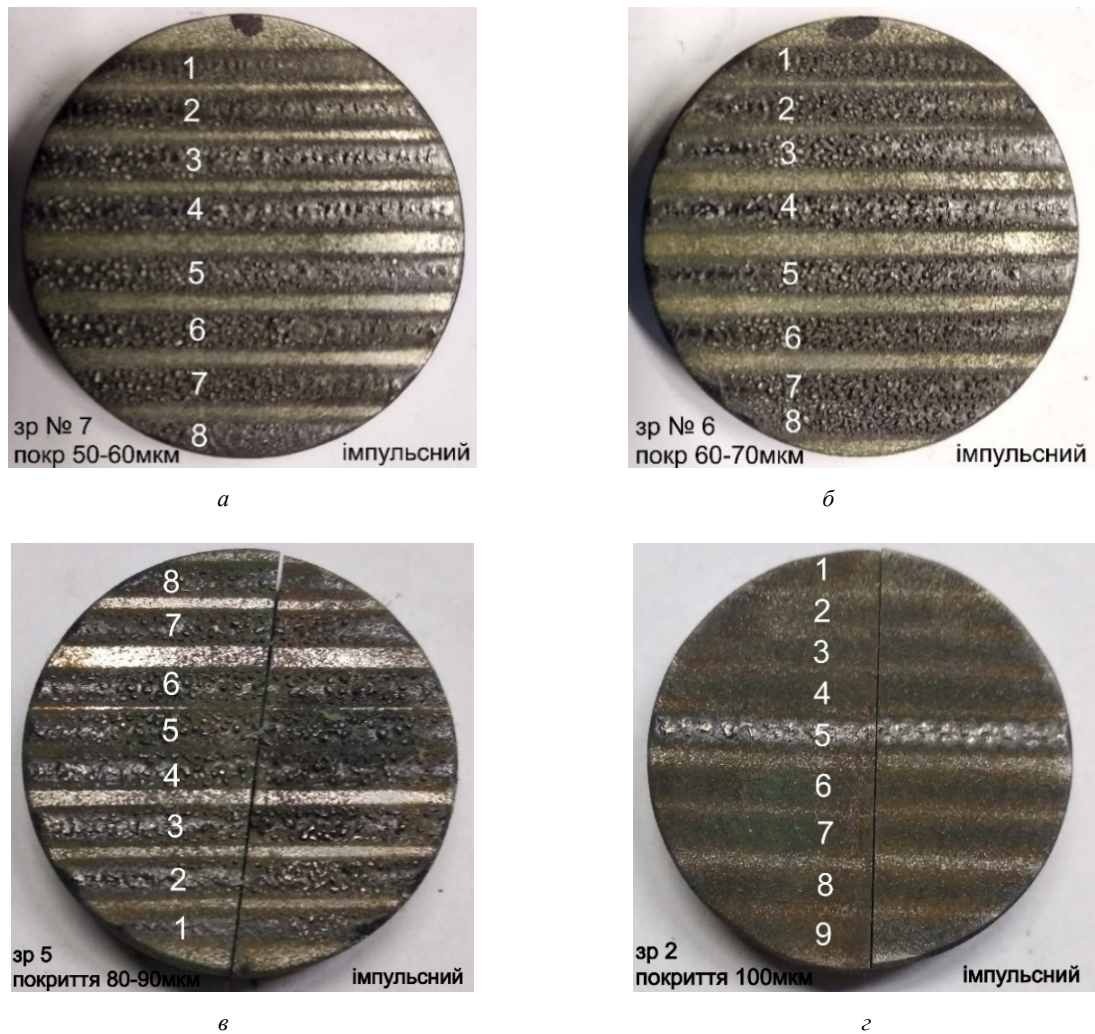


Рис. 6. Зовнішній вигляд зразків сталі 40XN2MA з плазмовим покриттям ХТН (12X18N10Т+TiB₂+CrB₂) після лазерної термоциклічної обробки імпульсним випроміненням на умовах опромінення, наведених в табл. 1: *a*- покриття 50–60мкм; *б* - покриття 60–70мкм; *в* – покриття 80–90 мкм; *г* - покриття 100 мкм

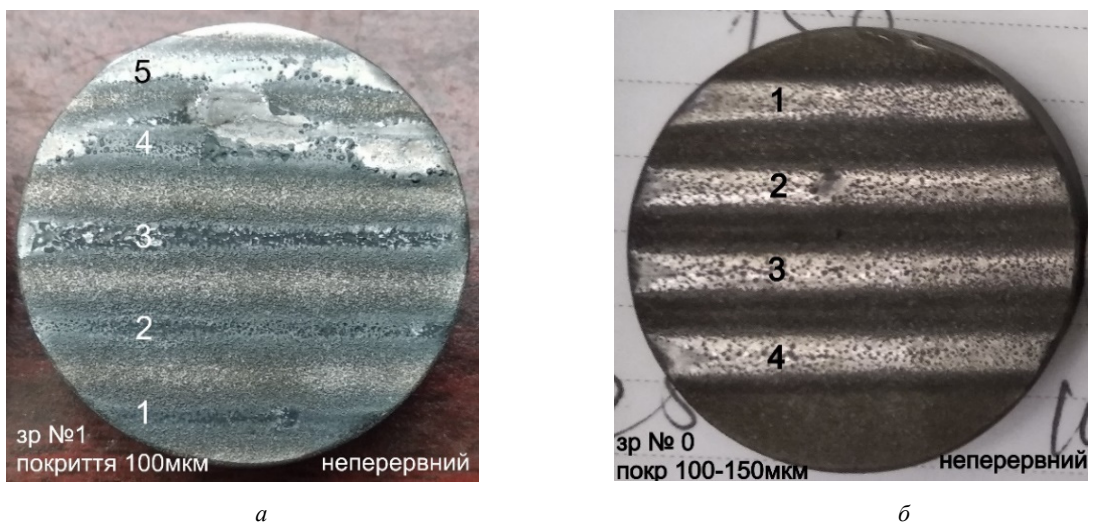


Рис. 7. Зовнішній вигляд зразків сталі 40XN2MA з плазмовим покриттям ХТН після термоцикування безперервним лазерним випроміненням: *a* – покриття 100 мкм; *б* – покриття 100–150 мкм

В таблиці 4 наведені умови лазерного опромінення плазмових покриттів безперервним випромінюванням и розмірні характеристики зон його термічного впливу.

Таблиця 4. Умови і результати опромінення зразків сталі 40ХН2МАЗ плазмовим покриттям ХТН різної товщини безперервним лазерним випромінюванням

Покриття	Кількість проходів	Швидкість переміщення, м/хв	Потужність, Вт	Ширина ЗТВ	Глибина ЗТВ
покриття 70–80 мкм	1	8	2500	3,82	0,5
	2	8	2500	4,18	0,55
	3	8	2500	4,05	0,62
	4	8	2500	3,24	0,47
покриття 90–100 мкм	1	8	2500	3,61	0,38
	2	8	2500	3,55	0,42
	3	8	2500	3,75	0,42
	4	8	2500	3,74	0,45
покриття 150 мкм	1	8	2500	3,94	0,5
	2	8	2500	4,1	0,53
	3	8	2500	4,38	0,55
	4	8	2500	4,4	0,56

Частина зразків з плазмовим покриттям після термоцикування імпульсним і безперервним лазерним випромінюванням піддавалась металографічному аналізу з використанням світлового мікроскопу Neofot 23, дюретричному аналізу на мікро твердомірі ПМТ-3 при навантаженні 50 і 100 грам, дослідженню мікроструктури і розподілу хімічних елементів на растровому електронному мікроскопі РЕМ 106. Міцність зчеплення плазмових покриттів після термоцикування вимірювалась штифтовим методом. Зносостійкість і коефіцієнт тертя оцінювались на машині тертя ПВК-2 по схемі «призматичний зразок (10×10) мм з покриттям – контр-зразок, кільце діаметром 50 мм і товщиною 10 мм зі сталі ШХ15, загартованої до твердості 60 HRC).

Дослідження мікроструктури, міцності зчеплення з основою та зносостійкості плазмових покриттів, підданих лазерному термоцикуванню

Дослідження властивостей плазмових покриттів ХТН у вихідному стані с точки зору рівномірності шару по товщині, суцільності, можливості забезпечення функціонального призначення та продуктивності процесу нанесення показало, що його найбільш ра-

ціональна товщина становить 50–100 мкм. На рис. 8 а, б представлена мікроструктура (а) плазмового покриття і його хімічний склад (б).

В напилених евтектичних покриттях спостерігаються області, які слабо виявляються травником, так звані білі шари, які не розплавлялися, невелика кількість пор (10–12 %) і сірі шари.

Основний об'єм покриття (70–80 %) становлять білі шари. Утворення білих шарів при напиленні є особливістю евтектичних сплавів на основі заліза. Вони виникають внаслідок швидкої кристалізації крапель розплаву на холодній підкладці. Такі шари мають підвищену хімічну стійкість, погано виявляються, відрізняються високою дисперсністю фазових складових. Характерною особливістю напилених покриттів є їх велика мікротвердість. Так, мікротвердість білих шарів становила (1250–1270) МПа, ділянок зі структурою евтектики – (830–850) МПа.

Температура верхньої границі циклу лазерного нагрівання плазмових покриттів, як імпульсним, так і безперервним випромінюванням, становила $0,75 \cdot T_{пл}$. Така температура забезпечує відсутність морфологічних змін в евтектичних кристалах фаз впровадження, і може вплинути на розпад металевої матриці, коагуляцію дисперсних кристалів фаз впровадження, що перебувають у білих шарах, які виникають при напилюванні, а також дифузійні процеси в зоні покриття-основа. Попередніми дослідженнями було встановлено, що доцільна кількість термічних циклів не перевищує чотирьох. Подальше їх збільшення практично не впливає на розмірні характеристики зони термічного впливу, але впливає на її фазовий склад, зменшуючи мікротвердість.

Таким чином, обраний температурний і кількісний режим термоциклічної обробки дозволяє впливати на дифузійні процеси на границі “покриття-основа”, структурний стан і термодинамічну рівновагу білих шарів.

Досліджувалися плазмові покриття системи ХТН, товщина яких змінювалась в діапазоні від 50 до 100 мкм, що піддавались лазерному імпульсному опроміненню при різних параметрах імпульсу і їх кількості, яка змінювалась від одного до чотирьох. Аналіз отриманих даних показав, що найбільша глибина і ширина зони термічного впливу спостерігається при товщині плазмового покриття 50–60 мкм і 4-х кратному опроміненні імпульсним випромінюванням (швидкість переміщення, 20 мм/с; тривалість імпульсу, 5 мс; частота імпульсів, 20 Гц; енергія в імпульсі, 8,95 Дж, середня потужність, 179 Вт). При таких умовах опромінення в зоні термічного впливу на межі між покриттям і основою спостерігається перерозподіл легуючих елементів. Але при способі нанесення плазмового покриття, використаного в роботі, не завжди забезпечується стабільною його товщиною. Тому звертають на себе увагу результати 4-х кратної лазерної обробки плазмового покриття товщиною 100 мкм, які відрізняються рівномірністю її розподілу по площі зразка.

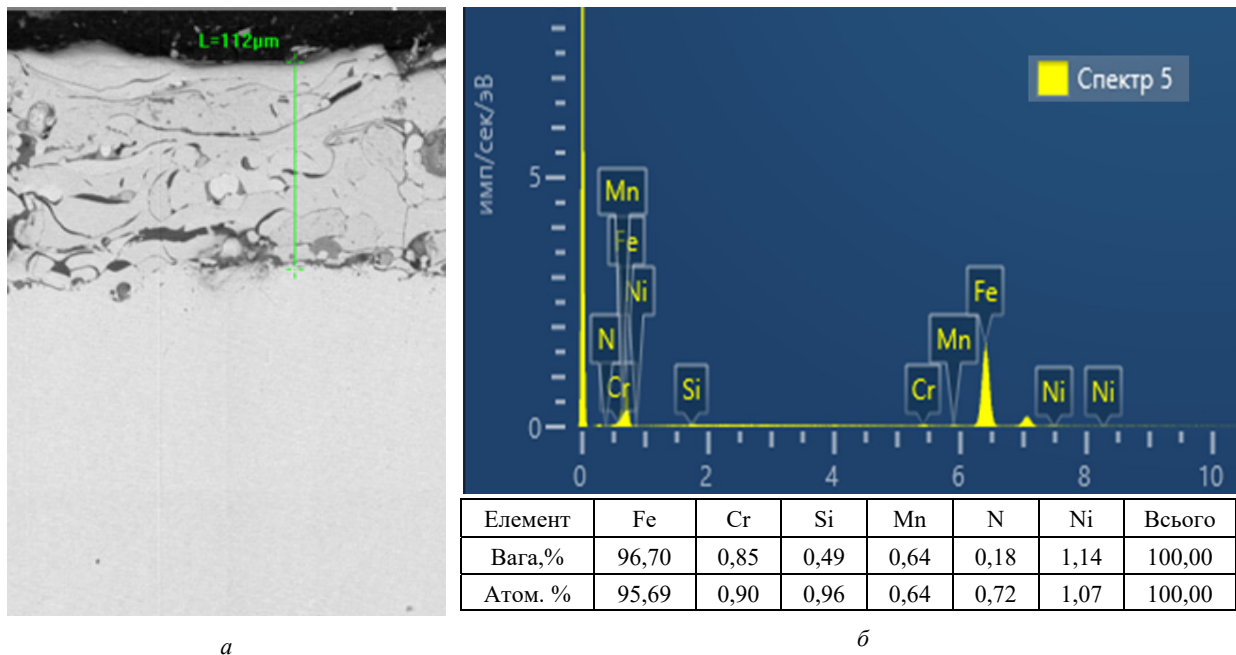


Рис. 8. Макроструктура плазмового покриття ХТН на сталі 40Н2МА (а) і його елементний склад (б)

Аналіз розподілу легуючих і інших елементів в плазмовому покритті і в основі показав, що на межі між плазмовим покриттям і сталлю 40ХН2МА, в наслідок 4-х кратного термоцикування, утворився проміжний перехідний шар, в якому відбувся перерозподіл легуючих елементів *Ti* із сталі в покриття, *Cr* із покриття в сталь, *Ni* із сталі в покриття. Наявність такого перехідного шару і такого перерозподілу легуючих елементів обумовлює можливість суттєвого підвищення міцності зчеплення плазмового покриття з основою. Виконані дослідження показали, що застосування лазерного термоцикування плазмових покриттів імпульсним випроміненням принципово дозволяє підвищити їх міцність зчеплення з основою, але при цьому має певні обмеження в застосуванні. А саме, розроблений і досліджений процес доцільно рекомендувати використовувати для термоцикування плазмових покриттів на виробках, які мають невеликі розміри площ функціональних поверхонь.

З метою розширення можливостей застосування лазерного термоцикування плазмових покриттів на великогабаритних виробках, у тому числі і на стволах вогнепальної зброї, досліджувався процес з використанням потужного безперервного лазерного випромінення (рис. 7, таблиці 2).

Кінетика зміни властивостей структурних складових покриттів залежно від кількості термоциклів при дії безперервного випромінення практично аналогічна тим, що відбуваються при імпульсному опроміненні, але є і особливості. Спостерігається зменшення мікротвердості для всіх структурних складових, що пов'язане з розпадом пересиченого твердого розчину основи. Необхідно відзначити, що мікротвердість евтектичних областей знижується тільки після чотирьох

термоциклів. Зазначене зниження мікротвердості викликано розпадом металевої матриці. Для білих шарів зі збільшенням кількості термоциклів спостерігається стабільне зменшення мікротвердості, що можливо викликано коагуляцією фаз впровадження.

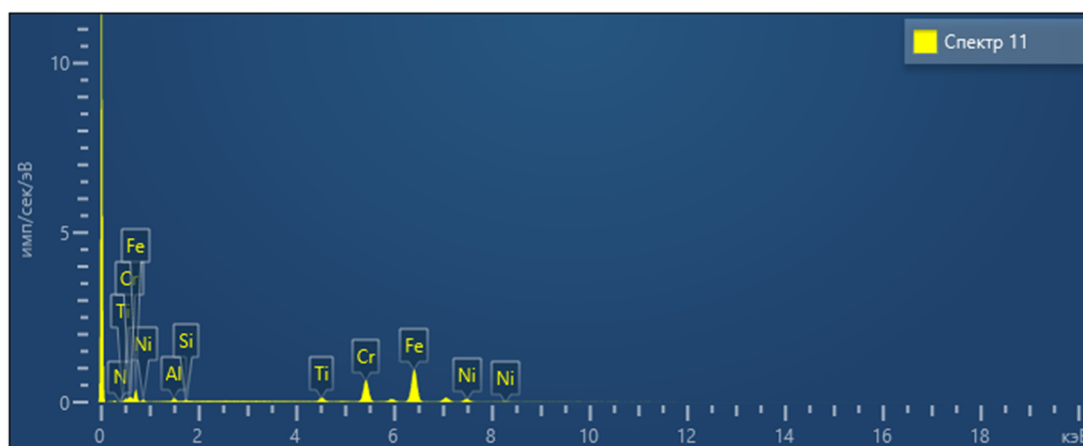
Аналіз результатів різних варіантів лазерної обробки плазмових покриттів безперервним випроміненням показав, що найбільш привабливим с точки зору продуктивності нанесення покриття, стабільності його властивостей і геометричних розмірів зони термічного впливу є варіант, коли товщина плазмового покриття становить 100 мкм, швидкість переміщення зразка 8 м/хв, потужність випромінення 2500 Вт, 4 термоцикли.

На рис. 9 а, б показано якісний (а) і кількісний (б) вміст хімічних елементів на ділянці в середній частині покриття ХТН на глибині 50 мкм і на межі його з'єднання з основою (сталлю 40ХН2МА) (в, з) після чотирикратного лазерного опромінення.

Співставлення вмісту легуючих елементів в плазмовому покритті до лазерного опромінення (рис. 8, б), після лазерного термоцикування в покритті (рис. 9, а, б) і на межі його з'єднання з основою (рис. 9, в, з) свідчить, що лазерне чотирикратне нагрівання плазмового покриття обумовлює, в області його з'єднання, перерозподіл легуючих елементів із покриття в основу і навпаки.

Наявність такого перерозподілу хімічних елементів на межі між покриттям і основою, що спостерігалось раніш при дії імпульсного випромінення, може також сприяти суттєвому підвищенню міцності їх зчеплення з основою.

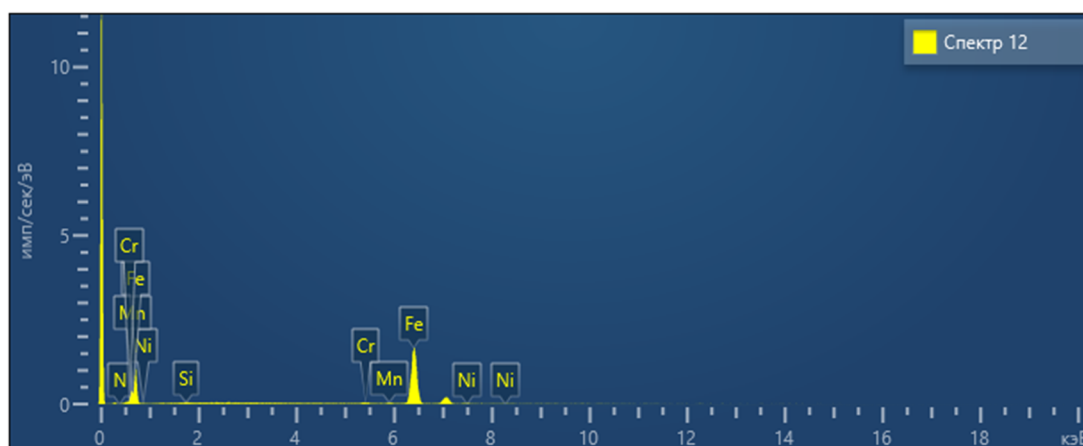
Для більш детального визначення кількісного перерозподілу хімічного складу по товщині плазмового покриття і в зоні з'єднання з основою було застосовано мікрорентгеноспектральний аналіз. Локальність



а

Спектр 11								
Елемент	Fe	Cr	Ni	Ti	Al	Si	N	Всього
Вага, %	60.19	25.03	8,87	3,25	2.18	0,48	0,00	100,00
Атом. %	57.45	25.66	8,05	3,61	4.31	0,91	0,00	100,00

б



в

Елемент	Fe	Cr	Mn	Ni	N	Si	Всього
Вага, %	96.35	0.83	0,97	1,47	0,08	0,31	100,00
Атом. %	95.83	25.66	0,98	1,39	0,30	0,61	100,00

г

Рис. 9. Якісний (а, в) і кількісний (б, г) вміст хімічних елементів в плазмовому покритті ХТН на глибині 50 мкм від поверхні (а, в) і на межі його з'єднання зі сталлю 40ХН2МА (б, г) після чотирикратного лазерного опромінення

зонда по площі становила 2,5 мкм, по глибині – 1,5 мкм. Для прицільного попадання зондом в досліджувані фази було використано режим SEM-фазовий контраст, обумовлений різницею в атомних номерах елементів (світле-легке, темне-важке).

На рис. 10, згідно даних кількісного аналізу, наведено розподіл хімічних елементів по товщині плазмового покриття і в основі. Перепади у вмісті хімічних елементів, свідчать про неоднорідність покриття. Ана-

ліз концентраційних кривих на межі “покриття-основа” показує, що термоциклічна обробка сприяє протіканню процесів взаємного масоперенесення елементів між покриттям і основою з утворенням дифузійних шарів, що обумовлюють підвищення їх міцності зчеплення. При цьому, як це вже частково відмічалось вище, між покриттям і основою має місце перерозподіл основних легуючих елементів, таких як ванадій, нікель, хром, титан і марганець (рис. 10).

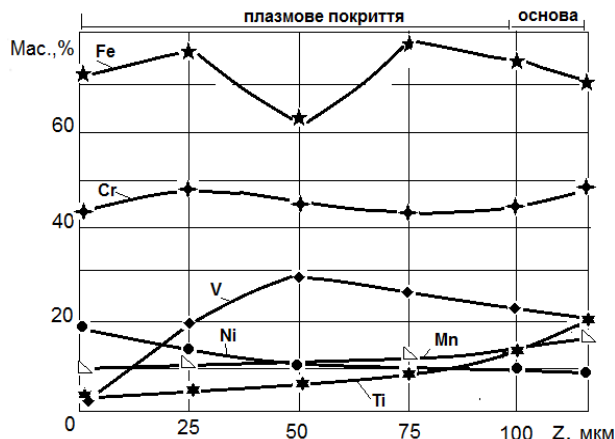


Рис. 10. Розподіл хімічних елементів по товщині плазмового покриття ХТН і шару основи зі сталі 40ХН2МА на межі їх з'єднання після чотирикратного нагрівання безперервним лазерним випромінюванням

Важливими характеристиками, якими прийнято оцінювати покриття, що наносяться плазмовим напиленням, є адгезійна і когезійна міцність. Під адгезійною міцністю, розуміють міцність зчеплення напиленого шару з основою, а під когезійною – міцність зчеплення складових самого покриття.

Міцність зчеплення покриття з основою, як відомо, залежить від стану напиленої поверхні, характеру хімічної взаємодії напиленого матеріалу з основою, напружень, що виникають на межі напиленого шару з основою. При цьому, підвищена адгезійна міцність можлива тільки в наслідок хімічної взаємодії між покриттям і основою.

Когезійна міцність залежить від фазового і хімічного складу та розміру зерна напиленого шару, залишкових напружень в ньому, пористості, однорідності структури.

Всі ці, наведені вище ознаки, мають структури плазмових покриттів, підданих чотирикратному лазерному термоциклуванню, тобто хімічну взаємодію напиленого матеріалу з основою, залишкові напруження стискування, значне зменшення розмірів зерна і пористості, що у сукупності повинні сприяти підвищенню міцності їх зчеплення з основою.

Для визначення міцності зчеплення покриття з основою було використано штифтовий метод. Результати досліджень показали, що у вихідному стані плазмове покриття має достатньо високу мікротвердість 1150–1200 МПа і невисоку міцність зчеплення з основою на рівні 14–18 МПа, що обумовлено великою різ-

ницею в твердості покриття і основи, підвищеною концентрацією залишкових напружень. Після лазерної термоциклічної обробки мікротвердість покриття дещо зменшується, але залишається на високому рівні і становить 1050–1100 МПа, а міцність зчеплення суттєво збільшується і становить 80–110 МПа, тобто збільшується в 4–5 раз. Важливим є також зменшення пористості покриття з 10–12 % до 7–8 %, що позитивно впливає на когезійну їх міцність. Крім того такі умови лазерного опромінення сприяють значному зменшенню крихкості підвищенню пластичності покриттів. Така особливість покриттів може обумовлювати утворення метастабільних вторинних структур, які значно впливають на підвищення зносостійкості пар тертя.

Висновки

1 Запропоновано два оригінальних процеси підвищення зносостійкості зовнішніх поверхонь металевих виробів, у тому числі стволів вогнепальної зброї, застосуванням комбінованої технології нанесення плазмових покриттів з наступним чотирикратним їх термоциклуванням в інтервалі температур 800–1000 °С імпульсним і безперервним лазерним випромінюванням у залежності від їх геометричних розмірів.

2. Теоретично, вирішенням задачі теплопровідності, і експериментально визначені умови лазерної обробки попередньо нанесених плазмових покриттів різної товщини на зразки матеріалу ствола, що забезпечують отримання на межі покриття з основою температури нагрівання на рівні 1000 °С, тобто оптимальні умови нагрівання і подальшого термоциклування.

3. Експериментально доведено, що лазерне термоциклування плазмових покриттів типу ХТН на виробках зі сталі 40ХН3МА, що працюють в умовах імпульсних високотемпературних навантажень, дозволяє, в наслідок перерозподілу основних легуючих елементів у перехідному шарі між покриттям і основою, в 4–5 раз (з 14–18 МПа до 80–110 МПа), підвищити міцність їх зчеплення, зменшити в півтора рази пористість, значно впливати на підвищення їх зносостійкості.

4. Результати досліджень свідчать, що для підвищення міцності зчеплення плазмових покриттів з основою шляхом їх лазерного термоциклування на малогабаритних виробках, з функціональною площею поверхні порядку 50–80 см², доцільно застосовувати обробку імпульсним високочастотним випромінюванням з середньою потужністю 300–400 Вт, для обробки поверхонь великогабаритних виробів – безперервне випромінювання з вихідною потужністю 2500 Вт.

References

- [1] К.А. Jushhenko, *Inzhenerija poverkhni*, Kyiv: Naukova dumka, 2007.
- [2] М.А. Ghlebova, А.В. Kornev and V.V. Ghlebov, "Pidvyshhennja jakosti ghazotermitichnykh pokryttiv pry termichnij obrobci strumamy vysokoji chastoty i lazernym promenem", *Svarochnoe proyzvodstvo*, No. 6. pp. 43–46, 2004.

- [3] A.V. Bezzubko, “Modifikatsiya struktury i svoistv gazotermicheskikh pokrytii s pomoshch'yu elektronno-luchevoi obrabotki”, in *Proc. Fiz. i khim. Vysokoenergeticheskikh sistem*, 2007, pp. 403–406.
- [4] V.S. Goncharov, “Gibridnaya tekhnologiya gazotermicheskikh uprochnyayushchikh pokrytii pri vosstanovlenii detalei slozhnoi geometrii”, in *Proc. Vseros. nauchno-tekhnich. Konfer. Provedenie nauchnykh issledovaniy v oblasti mashinostroeniya*, Tol'yatti, 2009. Ch. 1, pp. 159–164.
- [5] T.V. Troshhenko, “Pokryttja ta jikh vykorystannja v tekhnici”, in *Micnistj materialiv i konstrukcij*, Kyiv, 2006. pp. 981–1074.
- [6] Tomie Michio and Abf Nobuyuki, “Improvement of sprayed coatings with ultra high voltage EB melting”, *Trans. JWRI*, 21, No. 2, pp. 229–300, 1992.
- [7] Gu Jianfeng, “Jinshu rechuli-Heat Treat”, *Metals*, No. 2. pp. 1–9, 2013.
- [8] V. Lykoshva *et al.*, “The Application of the Hybrid Method the Powder-Laser-Casting Technology for Production of Porous Alloys Based on Aluminum”, *Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials*, No. 31, pp. 11–15, 2019. DOI: 10.4028/www.sci.entic.net/JMNM.31.11
- [9] M.V. Kindrachuk, N.V. Ishhuk and V.V. Posternak, “Trybotekhnichni vlastyvoli plazmovykh pokryttiv z dyskretnoju strukturoju”, *Problemy trybologhiji*, No. 1. pp. 75–81, 2003.
- [10] M.V. Kindrachuk *et al.*, “Sposib vygotovlennja ghazotermichnykh pokryttiv metalevykh detalej”, Patent 64344, MPK V23K 26/06 Ukraina, November 10, 2011.

Application of laser thermocycling to improve the quality of plasma wear-resistant coatings

L.F. Golovko, O.D. Kaglyak, V.V. Romanenko, M.S. Bloschchysyn

Abstract. *The problem of the article is designed to reveal the proposed, developed and researched new method of improving the adhesion strength of plasma wear-resistant coatings on the outer surfaces of weapons made of high-alloy, heat-resistant steels, using additional cyclic (3–4) times their heating by laser radiation to temperatures of 0.6–0.8 Tpl for a few milliseconds.*

The purpose of increasing the resource of use and the quality of the appearance of the weapon by applying wear-resistant coatings with increased adhesion strength to the base using plasma gas-thermal spraying followed by laser thermal cycling.

Determination of the main factors and parameters of the process of laser thermocycling of plasma coatings, their interrelationships, development of an algorithm for determining the conditions of laser thermocycling, establishment of the rational range of their values by mathematical modeling and experimental research.

The results of mathematical modeling of laser cyclic heating of plasma coatings of HTN of different thicknesses are presented, which allows determining the irradiation parameters that ensure their heating to temperatures at the ‘coating-substrate’ boundary ≤ 1000 °C, on the surface – to $T < Tpl$, at maximum cooling rates. It has been proven that laser thermocycling provides an increase in the adhesion strength of coatings to the base from 14–18 to 90–110 MPa, a decrease in porosity from 10–12 % to 7–8 %, which is due to the redistribution of alloying components at the “coating–base” interface, with the formation of elements of the metallurgical connection, contributes to a significant increase in wear resistance and a decrease in the coefficient of friction due to the formation of secondary ultradispersed film structures.

We consider laser thermocycling of plasma coatings is an effective method of improving their quality and strength of adhesion to the base.

Keywords: *plasma coating, laser thermocycling, irradiation, heating, bond strength, metallurgical bond, wear resistance.*